Website: ycyk.brit.com.cn Email: ycyk704@163.com

自适应光学技术在欧美激光通信地面站应用现状

耿天文^{∞1}, 雷呈强², 高世杰¹, 李亚添¹, 马 爽¹, 李学良¹, 李 林¹
(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033
2 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要:自适应光学技术是提高激光通信地面站单模光纤耦合效率、增加接收信号信噪比、提升激光通信可靠性的一 种重要手段。对欧美将自适应光学技术应用于激光通信地面站的情况进行了详细阐述与分析,主要内容包括自适应光学 系统的组成、参数和部分实验结果,为激光通信地面站及其自适应光学系统的设计提供有益的参考。

关键词: 自适应光学; 激光通信; 地面站

中图分类号: TN929.1;V443+.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0080-09 DOI: 10.12347/j.ycyk.20220122001

引用格式: 耿天文, 雷呈强, 高世杰, 等. 自适应光学技术在欧美激光通信地面站应用现状[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 80-88.

A review of the application of adaptive optics technology in European and American laser communication ground stations

GENG Tianwen, LEI Chengqiang, GAO Shijie, LI Yatian, MA Shuang, LI Xueliang, LI Lin

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Adaptive optics technology (AO) is an important means to improve the single-mode fiber coupling efficiency in the ground stations of the free space optical systems, increase the signal-to-noise ratio (SNR) of received signals, and improve the reliability of laser communication. This paper discusses the application of AO technology to laser communication ground stations employed by both Europe and the United States. Detailed description and analysis are carried out, and the main contents include the composition, parameters and some experimental results of the AO systems. It provides a useful reference for the design of laser communication ground stations and the corresponding AO systems.

Key words: Adaptive optics; Laser communication; Ground station

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220122001

Citation: GENG Tianwen, LEI Chengqiang, GAO Shijie, et al. A review of the application of adaptive optics technology in European and American laser communication ground stations[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 80–88.

引 言

随着空间技术的发展,星地通信对带宽的需求越来越高,部分应用场合对通信速率的需求已经达到 10 Gbps 甚至 100 Gbps,传统微波通信已经无法满足日益增长的需要。自由空间激光通信技术 FSO(Free Space Optics)由于其通信容量大,可满足高带宽的需求,同时还具有体积小、重量轻、功耗低、抗电磁 干扰、保密性强等优点,因此自由空间激光通信技术必然成为未来星地通信的关键技术之一,具有广阔 的应用前景。但光束在星地链路的传输过程中,受到大气信道的影响,会导致系统的吞吐量降低、可靠 性下降以及可用率降低。其中由于大气中云、降水、雾霾等引起的功率严重下降问题可通过合理的选址

应通信作者: 13504330079@163.com 收稿日期: 2022-01-22 收修改稿日期: 2022-02-08

和地面站优化配置来解决。大气湍流引起的光强闪烁、到达角起伏、相位起伏等现象也会进一步劣化系统性能,需要采取相应的技术进行补偿或抑制。自适应光学技术 AO(Adaptive Optics)是目前解决大气 湍流引起的波前畸变、提升通信吞吐量和提升系统可用率的关键技术之一。欧美学者在理论和实践方面 开展了大量研究,本文对国外带有自适应系统的激光通信地面站进行详细阐述与分析。

1 美国 OCTL

光通信望远镜实验室 OCTL(Optical Communications Telescope Laboratory)是以一台 1 m 口径望远 镜为核心装置的激光通信实验室,占地面积约 200 m²,如图 1 所示,位于南加州圣盖博山中,站址信息 见表 1,OCTL 的主要指标见表 2^[1]。OCTL 采用库德光路设计,最后一块库德镜可以旋转四个方向,连 接不同的后光路可以完成多种功能。OCTL 参与了美国星地激光通信的多个项目,其中 OPALS(Optical

Payload for Lasercomm Science)系统、LCRD(Laser Communications Relay Demonstration)系统均带有自适应系统,下面分别对两个系统进行介绍。

1.1 OPALS

OPALS 星载终端于 2014 年 4 月安装在国际空间 站 ISS (International Space Station)上, 2014 年 6 月至 10月,成功建立星地链路18次,其中一半发生在白天。 采用 200 μm 直径 APD 作为探测器的直接探测接收方 式,接收事先存储于星载终端的视频、文本和遥感数 据,通信速率 33 Mbps~50 Mbps,链路建立时间大于 2 min (链路建立时长受星载端机安装位置和激光安全 两方面的限制)。为了更好地利用现有的单模光纤高 速通信技术,必须在星地链路实现高效率的单模光纤 耦合,因此,2015年,OCTL 加装了带有自适应光学 的单模光纤接收系统,与 ISS 进行了下行激光通信实 验。带有自适应系统的 OPALS 地面接收系统是波音公 司委托 SAIC 公司进行开发的^[2,3],原理图如图 2 所示, 图中 FSM 为快速反射镜, OAP 为离轴抛物镜, MM 为 多模光纤, BS 为分光镜, DM 为变形镜, SRI 为自参 考干涉仪波前传感器, LNA 为低噪放大器, FBG 为光 纤布拉格光栅, PD 为光电二极管。

自适应光学系统采用的是 Boston Micro Machines 公司生产的 1000 单元微机电系统 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)变形镜,采用自参考干涉 仪 SRI(Self-Referencing Interferometer)作为波前传感 器,波前传感器中包含了FLIR公司生产的一款 InGaAs 相机,帧频达到 19 kHz,SRI 波前传感相比于 Shack-Hartmann 波前传感的优点是不需要波前重构, 波前测量结果可直接作用于变形镜,降低系统延迟。 该系统采用模场直径为10.4 μm的 SMF-28 光纤作为接 收,自适应系统在地面做 1.6 km 的试验时,接收功率 为 200 nW 时可以实现闭环校正。



图 1 OCTL 外观 Fig. 1 OCTL appearance

表1 OCTL 站址信息

Table 1	Site Information of OCTL
属性	数值
经度	117°40.9'(西经)
纬度	34°22.9'(北纬)
海拔	2 200 m
视宁度	0.5"~2"(夜间)2"~5"(白天)

表 2 OCTL 的主要技术指标

指标名称	数值
口径	1 m
跟踪精度	2" (rms)
主镜材料	FSS-99, 镀银
M1~M7 透过率	55%@1 550 nm
主望远镜焦距	75.8 m
WFE	0.054λ
主望远镜视场	500 µrad
指向精度	17 μrad
方位速度	20°/s
俯仰速度	10°/s



图 2 带有自适应系统的 OPALS 地面接收系统原理框图 Fig. 2 Schematic diagram of the OPALS ground receiving system with adaptive system

2015年3月4日(2:54 pm),地面站与国际空间站建链134 s,AO保持闭环状态,俯仰角从20°至60°。AO闭环和开环的远场光斑对比如图3所示, 耦合到光纤的功率和斯特列尔比SR(Strehl ratio) 在AO闭环状态下随着俯仰角度的变化如图4所示。 斯特利尔比平均值为0.6,在开环状态下小于0.02。 闭环和开环状态下耦合到光纤的光功率如图5所示,平均功率和功率的起伏都有大幅度减小。



图 4 耦合到光纤的功率和斯特利尔比在 AO 闭环状态下 随着俯仰角度的变化(闭环开始后 12 秒开始数据记录) Fig. 4 Coupled power and Strehl ratio versus the pitch angle in the closed-loop state of the AO system (closed-loop state started at 12 s)



图 3 AO 开环(左)和闭环(右)的远场光斑 Fig. 3 Far-field spots with AO open-loop (Left) and closed-loop (Right)





1.2 LCRD

LCRD 项目是为了实现两台地面站通过同步轨道卫星进行激光通信中继传输,同步轨道卫星为 STPSat-6,两台地面站分别为 OGS1 和 OGS2, OGS1 为 OCTL, OGS2 为位于夏威夷的 0.6m 口径望远镜,该项目也可实现国际空间站通过同步轨道卫星与地面站之间的通信。

美国航空航天局 NASA 为了满足 LCRD 项目的需要,在 OCTL 的库德房内建设了集成光学系统 IOS (Integrated Optical System), IOS 的自适应系统可同时满足 LCRD 项目和系外行星观测的需求。IOS 部分设计指标见表 3。光机布局如图 6 所示,红色为发射支路,蓝色为 AO 支路,WFS 位于紫色面包板

上,剩余的 AO 系统位于褐色和绿色面包板,发射位 于蓝色面包板,大气湍流模拟位于底部。各部分放置 于不同的面包板上,目的是方便从实验室搬入库德 房。AO 系统的波前探测采用 Shack-Hartmann 传感器, 波前探测相机选用的是比利时 Xenics 公司 Cheetah 系列高速 InGaAs 相机,每个子孔径照亮像元为 2×2, 帧频为 10 kHz。变形镜包括低阶变形镜 LODM (Low Order Deformable Mirror)和高阶变形镜 HODM (High Order Deformable Mirror),分别用于校正低空间频率 大幅度像差和高空间频率小幅度像差,设计主镜直径

表 3 IOS 设计指标		
Table 3 IOS Design Metrics		
项目	参数	
信标发散角、功率	280 μrad, 4×2.5 W	
信号发散角、功率	20 µrad, 10W	
可工作大气条件	5.2 cm@500 nm@zenith	
工作俯仰角(目标)	20°	
工作时间段	全天时	
单模光纤耦合效率	55%	
AO 校正后斯特利尔比	0.7	

分布 28 个促动器,因此,HODM 选用的是美国 Boston 公司 32×32 MEMS DM,行程 1.5 μm,直径约为 1 cm, LODM 为 12×12 MEMS DM,行程为 3.5 μm。



图 6 IOS 光机布局 Fig. 6 IOS optical layout

自适应控制器是在帕洛马山天文台(Palomar Observatory)中应用的 PAL3000 基础上进行了升级,进一步降低了延迟。接收光纤安装在 6 轴定位台,通过耦合入光纤中的光功率进行控制,克服由于温度变化导致的光纤位置漂移^[4-6]。

2 欧洲

2.1 法国 MéO 望远镜

法国 MéO 望远镜利用安装于 SOCRATES 微小卫星的 SOTA 终端进行了 AO 校正实验。MéO 望远镜和 SOTA 终端如图 7 所示。该实验是日本信息通信研究机构 NICT(National Institute of Information and Communications Technology)和法国空间研究中心 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)合作内容的一部分,也是第一个报道的地面与低轨微小卫星进行的激光 AO 校正实验。位于海拔 1 270 m 的法国格拉斯的 MéO 望远镜的接收直径为 1.5 m,发射为独立的 195 mm 口径,指向精度小于 2",指向重复精

图 7 MéO 望远镜(左)和 SOTA 终端(右) Fig. 7 MéO telescope (Left) and SOTA terminal (Right)

此次实验采用的 AO 系统由法国航空航天研究院 设计,如图 9 所示,但该 AO 系统不是专门为激光通信 研制,之所以采用 976 nm 下行激光也是为了兼容该 AO 系统^[7]。该系统采用 Shack-Hartmann 波前传感器, 子孔径为 8×8,波前传感相机采用的是 First Light Imaging 公司生产的 OCAM2 相机,分辨率为 240×240。 采用的是 CILAS 公司的 88 单元变形镜,stroke 大小为 ±5 μm,带宽达到 10 kHz。包括两个 Tip-Tilt 反射镜, 一个为了光瞳稳定,带宽为 10 Hz,一个为了校正大气 湍流引起的倾斜,带宽为 2 kHz。校正后光斑图像可通 过像素大小为 6.5 μm 的 sCMOS 相机记录。该系统由于 数值孔径与光纤不匹配,因此不能进行单模光纤耦合。

度 0.1", 最大速度 5°/s, 其库德光路如图 8 所示。





采用 Linux 系统计算机作为 AO 控制器,通过简化系统配置、降低算法复杂度等方式来降低系统延迟,在 1.45 k 帧频时延迟 3.3 帧,系统延迟较大,0 dB 带宽仅为 55 Hz,因此需要较好的大气条件才可以工作。



图9 MéO望远镜 AO系统原理图(左)和实物图(右)

Fig. 9 Schematic diagram (Left) and physical diagram (Right) of the AO system of the MéO telescope

2015 年 7 月 21 日夜间,与 SOTA 终端进行了星地试验,共进行了 145 s 的 AO 稳定闭环,闭环前后光斑图像如图 10 所示,右侧放大后图像中的白色圆圈代表单模光纤模场直径,通过光斑图像估算单模光纤耦合效率平均值为 8.8%, rms 为 3%^[8-11]。

2.2 ESA Optical Ground Station

欧空局光学地面站 ESA Optical Ground Station 的设计和建设是欧空局 SILEX 项目的一部分。其地点 位于西班牙的 Tenerife 岛,海拔 2 400 m。装备了 1 m 口径的 R-C Coude 望远镜,库德光路长度 36.5 m,能够与星载端机进行双向通信并进行系统性能分析,实景图如图 11 所示^[12,13]。



图 10 AO 系统闭环前后光斑图像 Fig. 10 Spots comparison of the closed-loop state and the open-loop state of the AO system



图 11 ESA OGS 实景图 Fig. 11 Appearance of ESA OGS

配备的 AO 系统设计参数见表 4,系统框图如图 12 所示,其中 TT 为二维高精度平面镜转台(tiptilt mirror),f2 位置为定位用的小孔,通信接收部分和波前传感部分 WFS(Wavefront Sensor)的分光比例

为 80:20, WFS 为 Shack-Hartmann 形式, 波前传感相 机选用的是 Xencis 公司的 Cheetah CL 系列相机,子孔 径数量为 11×11(有效为 88 单元),视场为 9",相机 有效区域为 128×128,最高帧频为 20 kHz。选用 BOSTON 公司的 140 单元(12×12)MEMS DM, stroke 为 5.5 μ m。AO 系统实物如图 13 所示,占用空间大约 为 A3 纸的尺寸,光从中间入射,左侧为 WFS,中间 下方为 DM。系统在 r₀>20 cm (1064 nm)的夜间可

表4	ESA OGS AO 系统主要设计指标
Table 4	Main design indicators of the ESA OGS
	AO sustam

AO system		
属性	数值	
r0(1 064 nm) for Strehl > 50%	10 cm	
number of corrected modes	75/90	
max. control loop frequency	20 kHz	
max. 0 dB bandwidth	500 Hz	

获得的斯特利尔比大于 70%。图 14 为在 25.8 km 水平链路对 AO 性能进行测试的结果,在 AO 开环时, 光斑为散斑,在 AO 闭环时,光斑接近理想艾里斑。



(省略了与 AO 无关光学件) Fig. 12 Block diagram of ESA OGS AO system





图 13 ESA OGS AO 系统实物图 Fig. 13 Appearance of ESA OGS AO system



图 14 25.8 km 水平链路实验, AO 开环(左), AO 闭环(右) Fig. 14 25.8 km horizontal link experiment, AO open loop (Left), AO closed loop (Right)

2.3 TAOGS

TAOGS(Transportable Adaptive Optical Ground Station)是德国 TESAT 公司和 Synopta 公司(瑞士 激光通信公司,现已被美国收购)受德国宇航中心 DLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)委托研制,目的是与 TESAT 公司生产的第一代和第二代 LCT 星载终端进行通信^[7,14]。TAOGS 可与近地 轨道 LEO(Low Earth Orbit)卫星和地球同步轨道 GEO(Geostationary Orbit)卫星进行通信,通信速率 分别为 5.625 Gbps 和 2.812 5 Gbps。TAOGS 方舱、粗指向装置、操作方舱内部如图 15 所示。



图 15 TAOGS 方舱、粗指向装置、操作方舱内部 Fig. 15 TAOGS shelter, coarse pointing device, and inside of the operating shelter

TAOGS 包括两个粗指向机构 CPA270 和 CPA100,搭配后端直径分别为 260 mm 和 100 mm 的望远 镜,CPA100 只负责发射 35 mm 或 95 mm 光束,CPA270 主要负责接收,也可发射 20 mm 和 35 mm 光 束, 20 mm、35 mm 和 95 mm 光束发散角分别为 33.9 μrad、19.4 μrad 和 7.1 μrad,两个粗指向装置需要 光轴对准然后同步工作。

TAOGS 光学框图与自适应光学系统实物图分别如图 16 和图 17 所示,其中 AS 为捕获跟踪相机, 全画幅帧频为 25 Hz,WFC 为 Shack-Hartmann 波前传感相机,采用的是 InGaAs 相机,ROI 读出频率为 500 Hz~10 kHz, CAPCam 为星校相机,工作在可见和近红外波段,TXCam 为 CPA100 的校准相机。FPM 和 PAM 分别为自适应倾斜快反和发射预瞄快反。采用 12×12 单元 MEMS DM,自适应系统工作条件为 大气相干长度 $r_0 < 10$ cm。与 GEO 建链时,波前传感相机帧频设置为 6.7 kHz,与 LEO 建链时,设置为 10 kHz。图 18 所示为 TAOGS 与安装于 GEO 的 LCT 端机建链时获得的自适应校正后的光斑图像,可以 看出,校正后光斑为衍射极限光斑。



Fig. 16 Optical block diagram of TAOGS

• 86 •



图 17 TAOGS 自适应光学 系统实物图 Fig. 17 Appearance of TAOGS adaptive optics system





3 结束语

欧美已经将自适应光学技术应用于 1 m 以上的大口径激光通信地面站,而且为了提升系统的性能, 在 26 cm 小口径移动式地面站中也应用了自适应光学技术,均取得了较好的实验结果。各系统多数采用 了成熟的 Shack-Hartmann 波前传感方式,并在其他波前传感方式如 SRI 上做了积极的探索。为了提升激 光通信地面站的可用率,必须提升其对抗湍流强度的能力,使其可在白天、低仰角这种严苛条件下工作 并保证单模光纤耦合效率,激光通信地面站所采用的自适应光学系统的时间分辨率和空间分辨率比较于 成像自适应系统需有较大的提高。欧美已经将激光通信自适应光学技术进行了较为全面的验证,具备了 工程化应用的能力。

目前,国内星地激光通信进入高速发展阶段,对带有自适应光学系统的高性能激光通信地面站的需求越来越多,希望本文对欧美激光通信自适应光学技术的综述可以为激光通信地面站的系统设计及自适应光学系统设计提供有益参考。

参考文献

- KEITH E W, JOSEPH K, ABHIJIT B, et al. Roberts. Operations at the JPL OCTL Telescope[C]//International Space Conference of Pacific-basic Societies (ISCOPS), 2007: 1-7.
- [2] WRIGHT M W, KOVALIK J, JEFF M, et al. LEO-to-ground optical communications link using adaptive optics correction on the OPALS downlink[C]//SPIE 9739, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, 973904, 2016.
- [3] ABHIJIT B, BOGDAN O, KENNETH S, et al. Optical payload for lasercomm science (OPALS) link validation during operations from the ISS[C]//SPIE 9354, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII, 93540F, 2015.
- [4] ROBERTS L C, ROBERTS J E, SANTOS F, et al. A laser communication adaptive optics system as a testbed for extreme adaptive optics[C]//Adaptive Optics Systems VI, 2018.
- [5] ROBERTS W T, SABINO P. LCRD optical ground station 1[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017: 82–88.
- [6] WILSON K E, LEWIS C. ROBERTS JR R. Developments in adaptive optics for the LCRD optical ground station at Table Mountain[C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2014, s4-1.

- [7] FISCHER E, BERKEFELD T, FERIENCIK M, et al. Development, integration and test of a transportable adaptive optical ground station[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2015: 1–6.
- [8] VEDRENNE N, VELLUET M T, CYRIL P, et al. First results of wavefront sensing on SOTA[C]. 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2015: 1–8.
- [9] PETIT C, VEDRENNE N, MICHAU V, et al. Adaptive optics results with SOTA[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2015: 1–7.
- [10] SAMAIN E, PHUNG D H, MAURICE N, et al. First free space optical communication in Europe between SOTA and MeO optical ground station[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2015: 1–7.
- [11] NICOLAS V, VELLUET M T, VINCENT M, et al. Characterization of atmospheric turbulence for LEO to ground laser beam propagation at low elevation angles[C]//Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2014, s4–3.
- [12] BERKEFELD T, SOLTAU D, CZICHY R, et al. Adaptive optics for satellite-to-ground laser communication at the 1m telescope of the ESA Optical Ground Station, Tenerife, Spain[C]//SPIE 7736, Adaptive Optics Systems II, 77364C, 2010.
- [13] SODNIK Z, ARMENGOL J P, CZICHY R H, et al. Adaptive optics and ESA's optical ground station[C]//SPIE 7464, Free-Space Laser Communications IX, 746406, 2009.
- [14] Saucke K, Seiter C, Heine F, et al. The Tesat transportable adaptive optical ground station[C]//SPIE 9739, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, 973906, 2016.
- [作者简介]
 - 耿天文 1980年生,硕士,副研究员,主要研究方向为激光通信地面站关键技术。
 - 雷呈强 1987年生,博士,助理研究员,主要研究方向为星地激光通信总体技术。
 - 高世杰 1979年生,博士,副研究员,博士生导师,主要研究方向为自由空间激光通信总体技术。
 - 李亚添 1990年生,博士,助理研究员,主要研究方向为激光通信干扰消除与差错纠正技术。
 - 马 爽 1987年生,博士,助理研究员,主要研究方向为激光通信发射系统关键技术。
 - 李学良 1988年生,博士,助理研究员,主要研究方向为激光通信高速信号采集及处理技术。
 - 李 林 1992年生,博士,助理研究员,主要研究方向为激光通信操控系统关键技术。

(本文编辑: 杨秀丽)

• 88 •